

УДК 621.923

А.И. Грабченко, д-р техн. наук, В.А. Федорович, д-р техн. наук,
Е.В. Островецх канд. техн. наук, Н.В. Козакова, канд. техн. наук,
Харьков, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ РАЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Представлено результати тривимірного моделювання процесу виготовлення алмазно-абразивного інструмента, що дозволяють виявити взаємовплив технологічних параметрів та фізико-механічних властивостей компонентів спікання на цілісність алмазних зерен та їх ефективне використання при шліфуванні

Ключові слова: алмазне зерно, металофаза, зв'язка, напружено-деформований стан, планування експеримента

Представлены результаты трехмерного моделирования процесса изготовления алмазно-абразивного инструмента, позволяющие определить взаимовлияние технологических параметров и физико-механических свойств компонентов спека на целостность алмазных зерен и их эффективное использование при шлифовании

Ключевые слова: алмазное зерно, металлофаза, связка, напряженно-деформированное состояние, планирование эксперимента

The results of three-dimensional modeling of the diamond-abrasive tool manufacturing process, which are presented, allow to determine the mutual influence of technological parameters and physical and mechanical properties of sintering components on the integrity of diamond grains and their effective use in grinding

Keywords: diamond grain, metal phase, bundle, stress-strain state, experiment planning

Определение оптимального сочетания прочностных свойств связки, алмазных зерен, их зернистости и концентрации при спекании шлифовальных алмазных кругов на металлических связках, обеспечивающего сохранение целостности алмазных зерен путем экспериментальных исследований является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом. Теоретическое исследование процесса спекания алмазоносного слоя шлифовального круга путем моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния системы «связка–алмазное зерно–металлофаза» с использованием метода конечных элементов существенно облегчает эту задачу.

Для создания 3D моделей компонентов алмазоносного слоя использовался программный пакет SolidWorks, что позволило изучить температурное и силовое воздействие на алмазоносный слой, возникающее при изготовлении круга.

Проводилась серия расчетов для фрагмента алмазоносного слоя,

включающего два зерна различной или одинаковой формы, окруженных массивом металлической связки (рис. 1) [1].

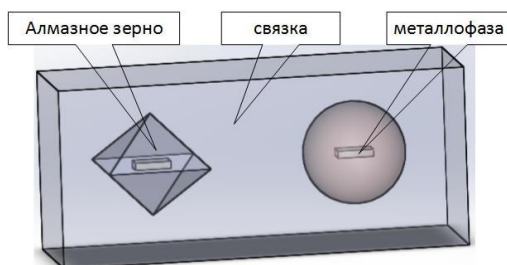


Рисунок 1 – Расчетная схема и 3D модель системы
«связка–алмазное зерно–металлофаза»

Связка представлялась в виде прямоугольного фрагмента размерами $800 \times 250 \times 350$ мкм, рассматривались алмазные зерна марки AC6 зернистостью 200/160 мкм, концентрация варьировалась от 50 до 150 %. Металлофаза, объемное содержание которой принималось 6 %, моделировалась в виде ориентированной в центре зерна единичной пластины призматической формы. Исследования проводились без учета покрытия на алмазных зернах. При моделировании варьировались геометрия зерна (октаэдр и шар), температура и давление процесса спекания, а также физико-механические свойства исследуемых компонентов круга. В модели зерно и связка рассматривались упругими сплошными телами. Модель нагружалась статической одноосной равномерно распределенной нагрузкой, а также температурой, приложенной к моделируемым телам. Пример разработанной 3D модели системы «связка–алмазное зерно–металлофаза» с граничными условиями, температурным и силовым нагружением представлена на рис. 2.

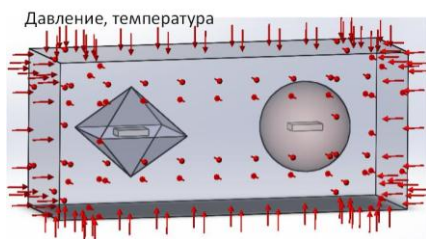


Рисунок 2 – Температурно-силовое нагружение
системы «связка–алмазное зерно–металлофаза»

Расчеты по методу конечных элементов позволили количественно оценить главные и приведенные напряжения, энергию деформации и плотность энергии деформации в спекаемых элементах в зависимости от их формы, физико-механических свойств и условий спекания. В качестве реакции модели на приложенную нагрузку рассматривались главные нормальные напряжения в узлах сетки, принадлежащих модели металлофазы, алмазного зерна и окружающей его связи. Объемы материалов считались разрушенными, если приведенные напряжения в них превышали соответствующие предельные значения. В качестве критерия разрушения принимали значения максимальных растягивающих напряжений алмазов определенных марок и зернистостей [2].

В качестве решателя (CAE программы) в данном случае использовался Cosmos Simulation. В расчетную модель закладывались следующие характеристики материалов: модуль упругости E , модуль объемного сжатия G , коэффициент линейного термического расширения (КТР) α , коэффициент Пуассона μ , предел текучести σ_0 и коэффициент теплопроводности λ по справочным данным [3].

В качестве критерия разрушения для исследуемых полей напряжений было принято предельное напряжение σ_n , соответствующее выходу макротрещин на поверхность материала синтетического алмаза [4]. Предполагалось, что возникновение макротрещин происходит в локализованном объеме материала, в котором действуют растягивающие ориентированные остаточные механические напряжения и напряжения от внешних нагрузок.

Поскольку в процессе спекания на компоненты алмазоносного слоя действуют одновременно несколько факторов, а именно температура, модуль упругости материалов, коэффициенты термического расширения, концентрация, то напряжения формируются с учетом их взаимовлияния. По результатам проведенных экспериментов были построены двумерные и трехмерные зависимости напряжений, возникающие при совместном действии различных факторов [5].

Для определения оптимальных условий спекания алмазного круга был использован метод планирования модельного эксперимента [6]. Это дает возможность прогнозировать оптимальные параметры процесса изготовления алмазно-композиционного инструмента и уже на стадии проектирования получить данные относительно оптимального сочетания зернистости, режимов спекания, марки алмазного порошка и материала связи, что значительно снижает время на дальнейшую диагностику и исследования. В расчетах использован план типа В4 [7].

В качестве исходных факторов для модельных экспериментов выбирались различные сочетание четырех факторов из следующего перечня: коэффициент теплового расширения металла-катализатора ($КТР_{мет}$), модуль

упругости металлофазы ($E_{мет}$), модуль упругости связи ($E_{св}$), режимы спекания алмазоносного слоя (температура T , $^{\circ}\text{C}$), относительная концентрация зерен в связке (%). Пример варианта выбранных факторов приведен в табл. 1.

Результаты проведенных 24-х расчетов для этих факторов приведены в табл. 2.

Обработка результатов планируемого модельного эксперимента для этих факторов позволила получить уточненную математическую модель, адекватно описывающую процесс спекания алмазных шлифовальных кругов в представленном диапазоне варьирования независимых факторов:

$$Y = 6,603 + 2,347X_1 + 1,310X_2 + 0,775X_3 + 1,278X_4 + 0,083X_1X_2 + 0,078X_1X_3 + 0,613X_1X_4 - 0,617X_2X_3 + 0,413X_2X_4 + 0,281X_3X_4 + 0,453X_1^2 - 0,769X_2^2 + 0,371X_3^2 + 0,043X_4^2 \quad (1)$$

Оптимизация полученного уравнения регрессии позволила получить значения факторов, при которых напряжения в алмазных зернах будут минимальными, что обеспечит эффективный процесс спекания алмазоносного слоя круга. Эти значения факторов использованы при дальнейшем анализе.

Таблица 1 – Уровни факторов

Уровни факторов	Факторы							
	Режимы спекания (температура T , $^{\circ}\text{C}$)		Свойства связи (модуль упругости $E_{св}$, Н/мм^2)		Свойства металла-катализатора (коэффициент теплового расширения металла-катализатора $KTP_{мет}$, $1/\text{K}$)		Относительная концентрация алмазных зерен, %	
	Натуральное значение	Кодированное значение X1	Натуральное значение	Кодированное значение X2	Натуральное значение	Кодированное значение X3	Натуральное значение	Кодированное значение X4
Верхний уровень	800	+1	2.0E+005	+1	7.0E-005	+1	150	+1
Основной уровень	600	0	1.5E+005	0	3.75E-005	0	100	0
Нижний уровень	400	-1	1.0E+005	-1	0.5E-005	-1	50	-1

Таблица 2 – Результаты планирования эксперимента для спекания алмазных кругов

№ эксперимента	Режимы спекания (температура T , °C)	Свойства связи (модуль упругости $E_{св}$, Н/мм ²)	Свойства металл-катализатора (коэффициент теплового расширения металл-катализатора $KTP_{мет}$, 1/K)	Относительная концентрация алмазных зерен, %	У максимальное напряжение в системе, ГПа
1	800	2,0E+005	7,0E-005	150	13,0
2	400	2,0E+005	7,0E-005	150	6,29
3	800	1,0E+005	7,0E-005	150	10,96
4	400	1,0E+005	7,0E-005	150	5,3
5	800	2,0E+005	0,5E-005	150	12,91
6	400	2,0E+005	0,5E-005	150	6,22
7	800	1,0E+005	0,5E-005	150	6,5
8	400	1,0E+005	0,5E-005	150	3,14
9	800	2,0E+005	7,0E-005	50	8,53
10	400	2,0E+005	7,0E-005	50	4,13
11	800	1,0E+005	7,0E-005	50	8,28
12	400	1,0E+005	7,0E-005	50	4,01
13	800	2,0E+005	0,5E-005	50	8,42
14	400	2,0E+005	0,5E-005	50	3,86
15	800	1,0E+005	0,5E-005	50	4,26
16	400	1,0E+005	0,5E-005	50	2,06
17	800	1,5E+005	3,75E-005	100	9,01
18	400	1,5E+005	3,75E-005	100	4,36
19	600	2,0E+005	3,75E-005	100	8,91
20	600	1,0E+005	3,75E-005	100	4,45
21	600	1,5E+005	7,0E-005	100	7,75
22	600	1,5E+005	0,5E-005	100	6,68
23	600	1,5E+005	3,75E-005	150	7,23
24	600	1,5E+005	3,75E-005	50	4,74

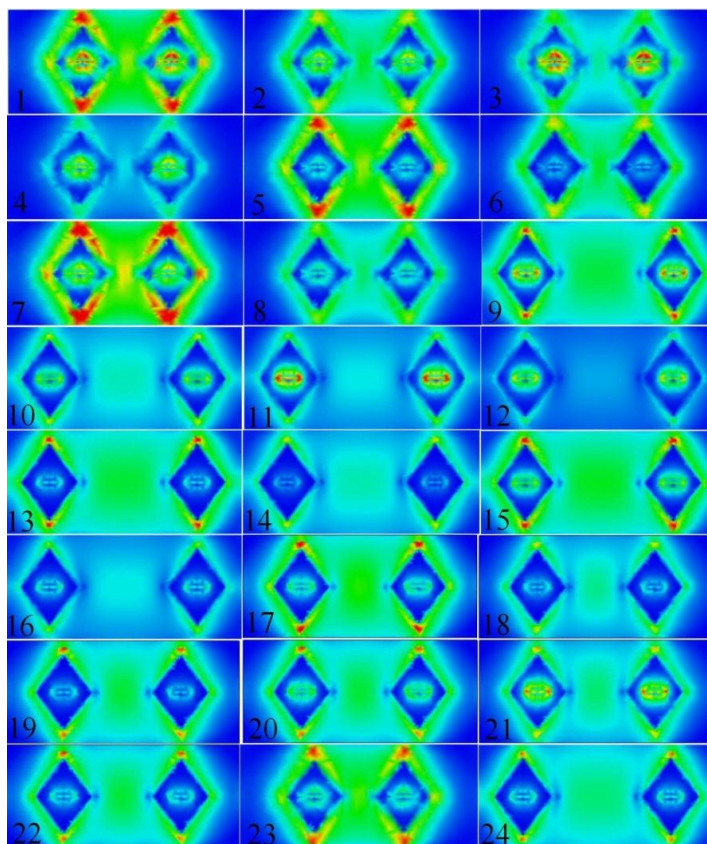


Рисунок 3 – Визуализация результатов расчета влияния выбранных факторов на напряженно-деформированное состояние зоны спекания алмазосодержащего слоя

Анализ всех проведенных 4-х факторных экспериментов показал, что из всех выбранных для исследования факторов температура в наибольшей степени влияет на напряженно-деформированное состояние алмазосодержащего слоя при его спекании. Зависимость эквивалентных напряжений от температуры спекания показана на рис. 4.

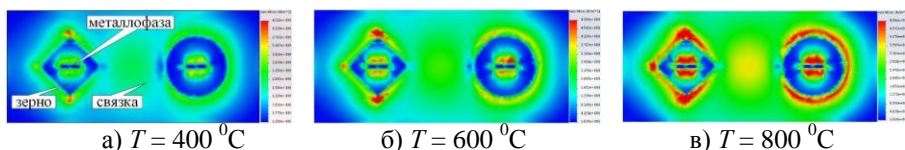


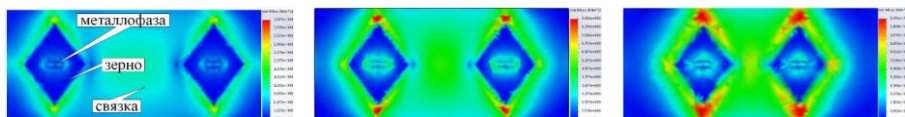
Рисунок 4 – Зависимость эквивалентных напряжений от температуры

В качестве физико-механических свойств для компонентов системы «связка–алмазное зерно–металлофаза» были заданы следующие значения: $E_{\text{мет}} = 5,2 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$; $KTP_{\text{мет}} = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$; $E_{\text{св}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$. Давление принималось равным 300 МПа, а концентрация составляла 100%.

С ростом температуры напряжения в рассматриваемой системе увеличиваются и составляют соответственно: $\sigma = 4,51 \text{ ГПа}$ при $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma = 7,93 \text{ ГПа}$ при $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma = 12,58 \text{ ГПа}$ при $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$. Такое распределение полей напряжений при температурной нагрузке в системе показало, что повышенными его значениями характеризуется не только область контакта зерна с металлофазой, но и грани алмаза. Напряжения, превышающие пределы прочности алмазных зерен, распределены таким образом, что стремятся отколоть от зерна его острые вершины (скруглить режущие кромки) или вызвать в нем трещины, что впоследствии отрицательно сказывается на режущей способности зерна и круга в целом.

Концентрация алмазных зерен также оказывает значительное влияние на их целостность во время спекания кругов на металлической связке [8]. Причиной этого могут быть возросшие контактные напряжения в системе, обусловленные увеличением модуля объемного сжатия. Чем больше упругих частиц алмаза находится в композите, тем хуже его сжимаемость, и тем больше влияние существующих тепловых и силовых нагрузок. При увеличении концентрации до 100 % и более в межзеренных областях наблюдается наложение тепловых полей, а также полей деформации (рис. 5).

Для исследуемой модели задавались следующие постоянные значения: $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$; $E_{\text{мет}} = 5,2 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$; $KTP_{\text{мет}} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$; $E_{\text{св}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$. При концентрации 50 % напряжения составляют 3,86 ГПа, при 100 % – 9,01 ГПа, при 150 % достигают 11,75 ГПа.



а) концентрация 50 %

б) концентрация 100 %

в) концентрация 150 %

Рисунок 5 – Зависимость эквивалентных напряжений от концентрации

Напряжения сосредоточены в местах включения металлофазы и на границе контакта зерна со связкой. Это объясняется дополнительной нагрузкой на грани алмаза, обусловленной напряжениями от смежного зерна и расширяющейся связки. Анизотропия алмаза также определяет неравномерность напряжений. Исходя из полученных эпюр напряжений, оптимальная концентрация не должна превышать 100 % и учитывать

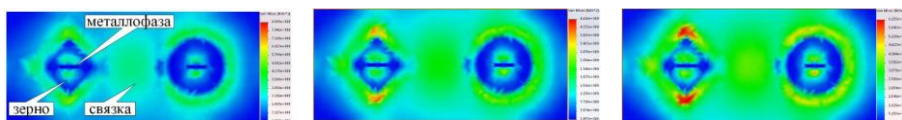
зернистость и марку алмазов, процентное содержание металлических включений и их ориентацию в зерне.

Увеличение модуля упругости металлической связки приводит к тому, что напряжения в ней и в зерне растут и могут достигать предела прочности для выбранной марки алмазного порошка. Более прочная связка сопротивляется термосиловым нагрузкам, стараясь удерживать алмазные зерна, что приводит к возрастанию контактных напряжений.

Температура спекания кругов на металлической связке (400–800 °С) оказывает значительное влияние на состояние металла-катализатора синтетического алмаза, что может вызывать внутренние напряжения как в зерне, так и внутри связки [9]. Зависимость эквивалентных напряжений от модуля упругости связки показана на рис. 6.

Для исследования выбранного фактора были заданы следующие параметры: $T = 500$ °С; $P = 300$ МПа; $E_{\text{мет}} = 5,2 \cdot 10^3$ Н/мм²; $KTP_{\text{мет}} = 3,75 \cdot 10^{-5}$ 1/К, концентрация составляла 100 %. С увеличением модуля упругости связки напряжения в рассматриваемой системе увеличиваются и составляют соответственно: $\sigma = 3,53$ ГПа при $E_{\text{св}} = 1,0 \cdot 10^5$ Н/мм²; $\sigma = 8,67$ ГПа при $E_{\text{св}} = 1,5 \cdot 10^5$ Н/мм²; $\sigma = 11,23$ ГПа при $E_{\text{св}} = 2,0 \cdot 10^5$ Н/мм².

Как видно из рис. 6 области максимальных напряжений располагаются на поверхности контакта зерен и связки, при этом самые высокие напряжения возникают вокруг острых кромок. Возросшие напряжения в связке распространяются на соседние участки и оказывают усиливающее воздействие на напряжения в зерне. Поскольку алмаз имеет более высокую теплопроводность, чем основа связки (медь), то тепловое расширение этой эвтектики влияет не только на прочность ее сцепления с абразивными зёрнами, но и на состояние металлофазы в зерне, которая также увеличивается в объеме. Полученные данные свидетельствуют о том, что модуль упругости связки может влиять на целостность алмазных зерен, но по сравнению с остальными факторами он играет второстепенную роль.



а) $E_{\text{св}} = 1,0 \cdot 10^5$ Н/мм²

б) $E_{\text{св}} = 1,5 \cdot 10^5$ Н/мм²

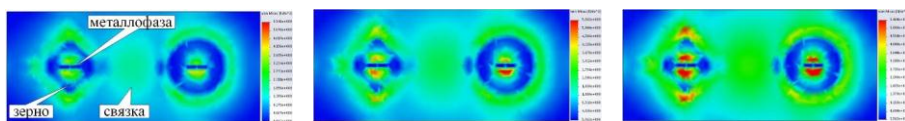
в) $E_{\text{св}} = 2,0 \cdot 10^5$ Н/мм²

Рисунок 6 – Зависимость эквивалентных напряжений от модуля упругости связки

Наличие большого количества металлических включений в кристаллах синтетического алмаза приводит к снижению их прочности и особенно термостойкости. Увеличение напряжений в зернах наблюдаются в тех местах,

где сосредоточена металлофаза, и по контуру самого зерна. В несколько раз больший, чем у синтетического алмаза, коэффициент термического расширения металла-катализатора приводит к повышению эквивалентных напряжений в модели. Анизотропия теплофизических свойств алмазных зерен также оказывает свое влияние на напряженно-деформированное состояние спека.

На рис. 7 представлены поля эквивалентных напряжений для зерна марки AC6 (200/160) при 100 % концентрации в зависимости от коэффициента термического расширения металлофазы.



а) $KTP_{мет} = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$

б) $KTP_{мет} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$

в) $KTP_{мет} = 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$

Рисунок 7 – Зависимость эквивалентных напряжений от коэффициента термического расширения металлофазы

Алмазоносная композиция имела следующие параметры: $T_{сп} = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $E_{мет} = 9,1 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$; $E_{св} = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$; $P = 300 \text{ МПа}$. При увеличении KTP металлофазы напряжения в рассматриваемой системе возрастают и составляют соответственно: $\sigma = 4,08 \text{ ГПа}$ при $KTP_{мет} = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ Н/мм}^2$; $\sigma = 7,24 \text{ ГПа}$ при $KTP_{мет} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ Н/мм}^2$; $\sigma = 12,41 \text{ ГПа}$ при $KTP_{мет} = 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ Н/мм}^2$.

Из результатов исследования видно, что наибольшие напряжения сконцентрированы в области металлофазы и в месте контакта зерна со связкой. Наблюдается также наложение полей деформаций и тепловых полей в межзеренном пространстве, что свидетельствует о росте растягивающих напряжений в связке. Уменьшение KTP металлофазы способствует снижению напряжений в исследуемой системе. Металлофаза является концентратором напряжений в зерне и может вызывать его растрескивание в местах своего расположения. Поэтому для исследования влияния модуля упругости металла-катализатора на целостность алмазных зерен были разработаны модели с определенными термомеханическими свойствами: $T = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $KTP_{мет} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$; $E_{св} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$; $P = 300 \text{ МПа}$. Картина распределения приведенных напряжений во фрагменте алмазоносного слоя на металлической связке M2-01 с зерном марки AC6, относительной концентрацией 100 % и металлофазой на основе никеля представлена на рис. 8.

Как показали расчеты при увеличении модуля упругости металлофазы напряжения в рассматриваемой системе возрастают и составляют

соответственно: $\sigma = 3,37$ ГПа при $E_{\text{мет}} = 5,2 \cdot 10^3$ Н/мм²; $\sigma = 6,72$ ГПа при $E_{\text{мет}} = 9,1 \cdot 10^3$ Н/мм²; $\sigma = 10,91$ ГПа при $E_{\text{мет}} = 13,0 \cdot 10^3$ Н/мм².

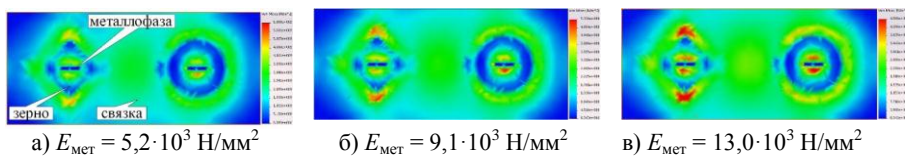


Рисунок 8 – Зависимость эквивалентных напряжений от модуля упругости металлофазы

Как видно из эпюр напряжений, металлические включения инициируют напряжения в зерне, которые уменьшаются в направлении от мест их локализации к периферии зерна, что объясняется существенным различием приведенного модуля упругости и коэффициента термического расширения металлофазы (~ в 4 раза) и соответствующих свойств алмаза. При увеличении модуля упругости, как и в случае повышения КТР металлофазы, также происходит наложение полей напряжений, вызванных силовой и температурной нагрузкой.

Увеличение модуля упругости металлофазы повышает ее предел прочности на растяжение, однако влияние температурной нагрузки значительно нивелирует этот эффект. Напряжения, расположенные на границах включений металлофазы, превышают пределы прочности алмаза, что вызывает развитие внутренних трещин в зерне и является предпосылкой к разрушению алмазного слоя круга.

Теоретические исследования показали, что в процессе спекания алмазного слоя штифтового круга наблюдаются дефекты структуры зерен в виде повреждения их целостности и скругления режущих кромок. С помощью 3D моделирования процесса спекания было изучено влияние концентрации алмазных зерен, температурной нагрузки, физико-механических характеристик связки и материала металлофазы на напряженно-деформированное состояние системы «связка – алмазное зерно – металлофаза». Исходя из полученных эпюр напряжений можно сделать вывод, что температура спекания и свойства металлофазы играют решающую роль в разрушении алмазных зерен. Применение метода планирования многофакторного эксперимента позволило получить экспериментальные зависимости влияния на процесс изготовления алмазно-абразивного инструмента основных факторов, а именно: модуля упругости связующего элемента и металла-катализатора, температуры спекания, коэффициента термического расширения металлофазы и относительной концентрации алмазных зерен. При увеличении данных значений наблюдается рост напряжений внутри зерна и на границе его контакта со связкой, которые

могут достигать предельных растягивающих значений для выбранной марки алмазного порошка.

С повышением прочности связки и концентрации алмазных зерен увеличивается модуль объемного сжатия алмазоносного слоя, что усиливает главные напряжения в модели. Возникает наложение термосиловых полей в областях между зёрнами. Анализ полученных эпюр напряжений показал, что форма алмазных зерен также влияет на характер распределения деформаций в исследуемой модели.

Планирование модельных экспериментов позволило определить оптимальные параметры процесса изготовления алмазно-абразивного инструмента и уже на стадии проектирования получить данные относительно оптимального выбора режимов спекания, марки алмазного порошка, его зернистости, концентрации и материала связки, что значительно снижает время на дальнейшую диагностику и исследования.

Список использованных источников: 1. *Anke Krüger*. Neue Kohlenstoffmaterialien, B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007, 473 s. 2. *Федорович В. А.* Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: – Дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 2003. – 469 с. 3. Физические величины. Справочник / *И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов*. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 4. *Цыбулько А. Е.* Выбор критерия предельного состояния материалов для инженерных расчетов / *А. Е. Цыбулько, Е. А. Романенко* // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 11. – С.3–5. 5. *Федорович В. А., Островерх Е. В., Козакова Н. В.* Методология определения рациональных характеристик алмазных кругов на этапе их изготовления // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 86. – С.187–199. 6. *Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф.* Планирование эксперимента. – Минск: изд-во БГУ, 1982. – 302 с. 7. *Спиридонов А. А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов/ *А. А. Спиридонов*. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с. 8. *Козакова Н. В.* Определение рациональных характеристик алмазных кругов путем 3D моделирования процессов их изготовления и шлифования сверхтвердых материалов.: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2005. – 210 с. 9. *Галицкий В. Н., Куришук А. В., Муровский В. А.* Алмазно-абразивный инструмент на металлических связках для обработки твердого сплава и стали. – К.: Наук. думка, 1986. – 144 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Anke Krüger*. Neue Kohlenstoffmaterialien, B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007, 473 s. 2. *Fedorovich V. A.* Razrabotka nauchnyh osnov i sposobov prakticheskoy realizacii upravleniya prispособляемост'ju prialmaznom shlifovanii sverhtverdyh materialov: – Dis. ... dokt. tehn. nauk: 05.03.01. - Har'kov, 2003. – 469 s. 3. Fizicheskie velichiny. Spravochnik / *I. S. Grigor'ev, E. Z. Mejlihov*. – M.: Jenergoatomizdat, 1991. – 1232 s. 4. *Cybul'ko A. E.* Vyborkriterija predel'nogosostojanijamaterialov dlja inzhenernyh raschetov / *A. E. Cybul'ko, E. A. Romanenko* // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2007. – № 11. – S. 3–5. 5. *Fedorovich V. A., Ostroverh E. V., Kozakova N. V.* Metodologija opredelenija racional'nyh harakteristikalmaznyhkrugov na jetape ih izgotovlenija // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Harkiv: NTU «HPІ», 2016. – Vip. 86. – С. 187–199. 6. *Krasovskij G. I., Filaretov G. F.* Planirovanie jeksperimenta. – Minsk: izd-vo BGU, 1982. – 302 s. 7. *Spiridonov A. A.* Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii tehnologicheskikh processov/ *A. A. Spiridonov*. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 184 s. 8. *Kozakova N. V.* Opredelenie racional'nyh harakteristikalmaznyhkrugov putem 3D modelirovanija processov ih izgotovlenija i shlifovanija sverhtverdyh materialov.: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01. – Har'kov, 2005. – 210 s. 9. *Galickij V. N., Kurishuk A. V., Murovskij V. A.* Almazno-abrazivnyj instrument na metallicheskih svjazzkah dlja obrabotki tverdogo splava i stali. – K.: Nauk. dumka, 1986. – 144 s.